

Variations saisonnières des caractéristiques chimiques et biologiques des sols forestiers interprétées par l'analyse factorielle des correspondances

PAR

Danièle BAUZON *, J. F. PONGE **, Y. DOMMERGUES *

(Avec la collaboration technique de Denise Boymond *)

INTRODUCTION

Dans le cadre d'une Recherche Coopérative sur Programme en Écologie du Sol (RCP 40) entreprise en 1963 (DELAMARE DEBOUTTEVILLE ; VANNIER, 1966), les caractéristiques stationnelles chimiques et biologiques de cinq stations françaises typiques ont été décrites : quatre stations de l'Est (Bellefontaine, Sivrite sous feuillus, Sivrite sous résineux, Taintrux) par DOMMERGUES et DUCHAUFOUR (1966), une station du Bassin Parisien (Brunoy) par BAUZON *et al.* (1967). L'interprétation des données recueillies au cours de cette première phase de recherche (BAUZON *et al.*, 1968, 1969) a été effectuée en faisant appel aux méthodes de regroupement en constellations (VAN DEN DRIESSE, 1965) à partir de la mesure des distances entre horizons de surface (HIERNAUX, 1965) et de corrélation de rangs (SPEARMAN, 1904).

La présente note a pour but d'apporter des informations complémentaires sur les propriétés biologiques de ces sols (en relation avec certaines de leurs propriétés chimiques) notamment en ce qui concerne les variations saisonnières de ces propriétés. Pour réunir ces informations, nous avons déterminé régulièrement tous les deux mois pendant une période de deux ans, les variables chimiques et biologiques de ces horizons de surface. Pour exploiter toutes les données obtenues, nous avons fait appel à la méthode d'analyse factorielle des correspondances (CORDIER, 1965). Cette méthode maintenant largement usitée dans divers domaines tels que taxonomie bactérienne (DEFAYOLLE *et al.*, 1968), sciences humaines et écologie (LEBART, FÉNELON, 1971) n'avait pas encore été exploitée, à notre connaissance, par les écologistes du sol.

* Centre de Pédologie Biologique du C.N.R.S., 54500 VANDŒUVRE-LÈS-NANCY,

** Museum National d'Histoire Naturelle, 91800 BRUNOY,

CARACTÉRISTIQUES STATIONNELLES DES HORIZONS DE SURFACE

Ces caractéristiques figurent au Tabl. 1.

TABLEAU I

Caractéristiques stationnelles des horizons de surface étudiés

Types d'humus	Nombre d'échant. prélevés sur 2 ans	Types pédologiques	Végétation	Situation géographique	Altitude
Mull calcique..	48	Rendzine sur calcaire Bajocien	Hêtre Charme Chêne	<i>Bellefontaine</i> Meurthe et Moselle	260 m
Mull eutrophe..	48	Sol brun lessivé sur Terra Fusca	Hêtre Charme Bouleau	<i>Sivryle</i> Meurthe et Moselle	360 m
Mull-Moder....	48	Sol brun lessivé sur Terra Fusca	Epicéa		360 m
Mor-Moder....	48	Sol lessivé podzolique sur limons des plateaux	Chêne	<i>Sénart</i> Essonne	80 m
Mor.....	48	Podzol humoferrugineux sur grès vosgien	Pin sylvestre	<i>Taintrux</i> Vosges	700 m

MÉTHODES

1) Mise en place du dispositif expérimental et mode opératoire des prélèvements.

On a choisi dans chaque région les sols qui nous semblaient les plus typiques. Sur chaque site, on a délimité quatre placeaux, d'une surface respective de 1 m² sur une aire de 75 m². Sur chaque placeau, on a retiré la litière, puis l'horizon 0-10 cm a été extrait en totalité pour être homogénéisé très soigneusement sur une toile et tamisé afin d'éliminer les racines et les débris grossiers. Une partie de ce sol tamisé a été réparti dans une douzaine de sacs en tulle de nylon à mailles fines, qui ont été fermés par un fil de fer dont une extrémité portait un repère numéroté pour permettre un tirage au sort de chaque placeau suivant une table de nombres au hasard, au moment de chaque prélèvement. Les sacs ont été couchés et placés dans l'ordre sur deux lignes dans la fosse formée lors de l'extraction de l'horizon 0-10 cm, puis recouverts par le sol restant et enfin par la litière correspondant à chaque placeau. Les premiers prélèvements par tirage au sort ont été faits au bout de six mois. Ce temps a été estimé suffisant pour éliminer la perturbation initiale. Avant de procéder aux analyses chimiques et biologiques, il a été effectué un nouveau tamisage et une nouvelle

homogénéisation du contenu de chaque sac. Dans le cas particulier des variables biologiques, chaque analyse a été répétée trois fois et comparée à un témoin.

Cette étude s'est déroulée de septembre 1966 à juillet 1968 inclus, sauf dans le cas du mor-moder du sol lessivé podzolique de Sénart, dont les prélèvements ont débuté en octobre 1968 et ont été achevés au début de septembre 1970.

2) Analyses effectuées et expression des résultats.

a) Variables chimiques :

- pH : mesuré dans l'eau (rapport 1/2,5).
- Humidité (H), exprimée en pourcent de sol sec *.
- Carbone (C), teneur déterminée par combustion au *carmhograph* et exprimée en grammes de carbone pour 100 g de sol sec *.
- Acides fulviques (AF), Acides humiques (AH), extraction par le pyrophosphate de sodium et le sulfate de sodium, dosage par le permanganate suivant la méthode décrite par DUCHAUFOR et JACQUIN (1966). Teneurs exprimées en grammes de carbone pour 100 g de sol sec *. Ces variables manquent dans le cas du mor-moder de Sénart.
- Azote (N), teneur déterminée par la méthode Kjeldahl, et exprimée en grammes d'azote pour 100 g de sol sec *.
- Azote ammoniacal (N-NH₄), Azote nitrique (N-NO₃), les teneurs en N-NH₄ dosé par distillation, et en N-NO₃ déterminé par la méthode colorimétrique à l'acide 2-4 phénoldisulfonique (JACKSON, 1960), sont exprimées en ppm d'azote en fonction du sol sec *. Ces variables manquent dans le cas du mor-moder de Sénart.
- C/N : rapport entre les teneurs en carbone et en azote.
- Complexe absorbant : bases échangeables (Ca), (K), (Mg) et capacité totale d'échange (T) : dosages effectués suivant la méthode classique (DUCHAUFOR, 1970), teneurs exprimées en milliéquivalents pour 100 g de sol sec *. Ces variables manquent dans le cas du mull calcique de Bellefontaine et du mor de Taintrux.

b) Variables biologiques :

- Dégagement de CO₂ (CO₂) et coefficient de minéralisation (CO₂/C), CO₂ mesuré au laboratoire suivant la technique décrite antérieurement (DOMMERGUES, 1960). Les résultats sont exprimés en mg de CO₂ dégagé en 7 jours par g. de sol sec *, ou en fonction du carbone du sol, sous la forme du coefficient de minéralisation du carbone $\frac{C \text{ du } CO_2}{C \text{ total}} \times 100$
- Activité déshydrogénasique (AD), déterminée suivant la méthode de CASIDA *et al.* (1964) et exprimée en mg TPF formés en 24 h par g de sol sec *, **.
- Activité de la saccharase du sol (SAC), déterminée suivant la méthode de HOFFMANN et SEEGERER (1951) et exprimée en micromoles de sucres réducteurs *** formés par 24 h et par g de sol sec *.
- Activité de l'amylase du sol (AMYL), déterminée suivant la méthode de ROSS (1965) et exprimée en micromoles de sucres réducteurs *** formés par 96 h par g de sol sec *.

* Sol séché à l'étuve à 105° C.

** Dans nos travaux antérieurs (BAUZON *et al.*, 1967, 1968, 1969) les valeurs étaient exprimées en µlH/24 h/g sol sec, comme le préconisait CASIDA *et al.* (1964).

*** Dans nos travaux antérieurs (BAUZON *et al.*, 1967, 1968, 1969) les valeurs étaient exprimées en nanomoles de sucres réducteurs formés par minute et par g de sol sec, comme le préconisait ROSS (1965).

- Numérations microflore totale (MT), bactéries ammonifiantes (AMMO), Clostridium fixateurs d'azote (CLOS), bactéries nitreuses (Nx), bactéries dégradant le citrate de fer (MFe). Numérations à partir de suspensions-dilutions en milieux liquides classiques de POCHON et TARDIEUX (1962) sauf pour les deux dernières, suivant MEIKLEJOHN (1953, 1965) pour les (Nx), et HARDER (DOMMERGUES et DUCHAUFOR, 1965) pour les (MFe). Lectures au 7^e jour, sauf pour (Nx) au 21^e jour. Les densités microbiennes de ces différents groupes physiologiques sont calculées à l'aide de la table de McGRADY (POCHON et TARDIEUX, 1962) et sont toutes exprimées en unité par g de sol sec*. Les numérations (MT) et (Nx) manquent dans le cas du mor-moder de Sénart.

3) Analyse factorielle des correspondances.

Au départ, les résultats se présentent sous la forme d'un tableau à double entrée comportant :

- autant de colonnes (p) que de *variables* étudiées (celles-ci ont été énumérées au paragraphe précédent) X_j
- autant de lignes (n) que de *prélèvements* effectués.

Un prélèvement pouvant être caractérisé par p « notes » se référant chacune à l'une des variables étudiées, il est commode d'associer à chaque prélèvement un point figuratif dans un espace à p dimensions R_p : l'ensemble des résultats expérimentaux définit un « nuage » de n points, dont il est important de connaître la répartition dans l'espace R_p , et cela indépendamment du système d'axes initial $\{OX_j\}$. Supposons que l'on affecte à tous les points du nuage précédent, une masse fictive identique : on peut calculer le centre de gravité G d'un tel système, ses moments d'inertie principaux I_{GZ_j} et les axes principaux d'inertie correspondants. Les axes principaux d'inertie $\{\overrightarrow{GZ_j}\}$ définissent un système d'axes (une base) commode pour mettre en évidence l'extension du nuage des points-prélèvements, dans certaines directions privilégiées de l'espace R_p : on a donc tout intérêt à substituer aux p variables initiales X_j , les p nouvelles variables Z_j que l'on sait, *a priori*, caractéristiques de la répartition des points dans l'espace R_p . Un tel changement de variables est un problème classique d'algèbre linéaire (DEFAYOLLE *et al.*, 1968) dont la résolution s'effectue sans aucune approximation.

L'extension du nuage dans la direction GZ_i est mesurée en toute rigueur par la quantité $\{I_{GZ_i}\}^{-1/2}$ (longueur du demi-axe correspondant de l'hyperellipsoïde centré d'inertie). Il devient ainsi possible de classer les nouvelles variables Z_j sur ce critère, afin de sélectionner les plus sensibles : on est en effet conduit logiquement à réduire de p à k le nombre de variables caractéristiques du système, en négligeant les axes de faible extension du nuage. Géométriquement, cette procédure suppose que les points du nuage se regroupent statistiquement dans un sous-espace $R_k \in R_p$.

En pratique, on se limite souvent à une (ou plusieurs) projections du système dans un plan défini par deux axes principaux d'inertie GZ_1, GZ_2 choisis sur le critère évoqué précédemment. Il est intéressant de faire apparaître sur le graphique correspondant :

- Les projections des n points du nuage : M_i
- les projections des p vecteurs unitaires portés par les axes initiaux OX_j , relatifs aux anciennes variables : P_j .

Dans ce mode de représentation : plus un « point variable P_j » est proche d'un « point prélèvement M_i », plus la variable j est significative du prélèvement i,

* Sol séché à l'étuve à 105° C.

et prend des valeurs élevées (comparativement aux autres variables), pour ce prélèvement. Un tel diagramme fait donc ressortir les variables qui caractérisent le mieux un groupe de prélèvements.

Que la variable j prenne des valeurs très élevées, ou au contraire des valeurs très faibles, constitue, dans le cadre de notre étude, une information tout aussi précieuse. Cette remarque nous a conduit à substituer à chaque variable j deux variables complémentaires :

- l'une j^+ représentative des fortes valeurs du paramètre j
- l'autre j^- représentative de ses faibles valeurs.

Sur le diagramme précédent, il apparaît ainsi deux pôles Pj^+ et Pj^- ; la droite joignant ces deux pôles matérialise le gradient des faibles aux fortes valeurs du paramètre j .

RÉSULTATS

1) Remarque sur la présentation des données.

Il ne nous est pas possible, dans le cadre de cet article, de présenter, du fait de leur importance et de leur nombre, les tableaux détaillés des données auxquelles nous avons appliqué l'analyse factorielle des correspondances. Nous avons seulement fait figurer (Tabl. II) les valeurs minimales et maximales prises par chacune des variables étudiées au cours du cycle expérimental des deux années, pour chacun des placeaux des cinq horizons de surface. Les variables sont mentionnées par leurs symboles, les unités sont dans le texte. Les blancs en regard de certaines variables correspondent à l'absence de données.

2) Variations saisonnières.

a) Azote ammoniacal ($N-NH_4$).

Les Figures 1 a, 1 b, montrent la variation saisonnière de la variable $N-NH_4$ pour tous les placeaux de quatre sur cinq des horizons de surface : mull calcique, mull eutrophe, mull-moder, mor. Les coordonnées par rapport à l'axe I des analyses partielles ont été représentées également sur ces figures avec une échelle arbitraire. On note tout d'abord que ces coordonnées par rapport à l'axe 1 varient dans le même sens que les valeurs. Cet axe est donc tout particulièrement lié à la variable $N-NH_4$. D'autre part, on observe effectivement des variations saisonnières auxquelles on peut se fier, car les quatre placeaux d'un même horizon de surface varient à peu près de la même façon.

Les prélèvements ayant été faits à peu près aux mêmes dates, ces horizons peuvent facilement être comparés. On observe, au cours des deux années, trois pics de valeur élevée en $N-NH_4$, le premier en septembre ou en novembre 1966, le second en juillet ou en septembre-octobre 1967 (pour le mull calcique de Bellefontaine, il est précédé d'un pic en mai) le troisième toujours en mai 1968. Ces trois pics cependant n'ont pas la même importance relative selon les horizons de surface, et d'une année à l'autre, ces brusques montées n'apparaissent pas aux mêmes dates. Ce qui est plus constant, ce sont les

TABLEAU

Valeurs minimales et maximales de chaque variable chimique et biologique à l'intérieur

Horizons de surface	Sta-tions	Pla-ceaux	pH	H	C	AF	AH	N	N-NH ₄	N-NO ₃	C/N
MULL CALCIQUE	Bellefontaine	1	7,3 7,9	38,6 82,1	7,47 11,40	0,49 1,86	0,36 1,04	0,68 1,03	0,42 13,00	1,16 5,54	10,5 13,8
		2	7,3 7,8	44,5 90,2	7,94 12,80	0,65 4,58	0,30 1,18	0,66 1,03	0,43 12,30	1,11 11,20	10,8 15,3
		3	7,3 7,8	53,4 107,0	8,84 15,70	0,69 2,23	0,31 1,12	0,70 1,29	0,44 19,40	1,37 16,10	10,3 13,8
		4	7,4 7,9	44,1 70,7	7,87 11,00	0,51 1,63	0,31 1,08	0,65 0,82	0,21 17,90	0,76 19,30	10,2 16,2
		1	4,7 5,9	22,2 38,5	2,14 3,63	0,17 0,84	0,00 0,52	0,13 0,17	0,45 17,00	0,20 5,70	12,8 23,6
		2	4,9 6,1	20,6 36,6	1,93 3,37	0,19 0,81	0,00 0,50	0,14 0,19	0,70 16,20	0,11 3,84	11,5 18,8
		3	5,5 6,5	27,2 41,1	2,60 3,20	0,16 1,10	0,17 0,58	0,13 0,21	0,67 13,00	0,10 10,30	12,9 21,6
		4	5,0 5,9	24,6 43,3	2,18 3,25	0,17 0,91	0,00 0,52	0,10 0,22	0,33 10,00	0,13 1,63	12,1 26,4
MULL EUTROPHE	Sivrite feuillus	1	4,6 5,5	19,2 48,7	2,46 3,42	0,18 1,06	0,00 0,60	0,17 0,21	0,27 14,00	0,13 9,10	12,8 18,0
		2	4,3 5,0	25,0 39,3	2,80 3,38	0,22 0,95	0,00 0,54	0,11 0,19	0,12 10,00	0,20 5,38	14,4 26,8
		3	4,2 4,9	21,6 36,2	2,41 3,24	0,18 0,81	0,00 0,58	0,15 0,18	0,13 16,10	0,13 2,68	14,5 19,3
		4	4,4 5,1	28,2 40,3	2,26 3,26	0,19 0,86	0,00 0,51	0,14 0,19	0,34 10,00	0,10 1,32	14,0 19,8
		1	3,5 4,7	16,6 54,5	4,60 5,92			0,23 0,27			17,8 24,3
		2	3,6 4,5	16,4 50,0	5,73 6,98			0,28 0,34			17,8 23,4
		3	3,8 4,5	14,2 43,9	2,74 4,36			0,17 0,23			13,0 21,8
		4	3,7 4,3	14,0 44,2	3,48 4,85			0,22 0,26			15,2 20,7
MULL-MODER	Sivrite résineux	1	3,4 3,9	13,9 57,9	6,96 9,86	0,16 1,57	0,46 1,27	0,23 0,29	0,35 9,59	0,14 0,72	27,4 36,1
		2	3,1 3,9	10,8 44,2	4,88 6,86	0,12 1,24	0,37 1,13	0,15 0,26	0,22 18,30	0,13 0,96	23,7 37,8
		3	3,3 4,0	24,4 75,7	7,91 12,40	0,18 1,76	0,60 1,92	0,26 0,41	0,25 6,86	0,23 1,06	26,8 36,4
		4	3,4 4,1	41,8 63,3	7,60 10,70	0,17 1,39	0,49 1,43	0,23 0,37	0,35 7,06	0,15 0,92	23,1 41,2
		1	3,4 3,9	13,9 57,9	6,96 9,86	0,16 1,57	0,46 1,27	0,23 0,29	0,35 9,59	0,14 0,72	27,4 36,1
		2	3,1 3,9	10,8 44,2	4,88 6,86	0,12 1,24	0,37 1,13	0,15 0,26	0,22 18,30	0,13 0,96	23,7 37,8
		3	3,3 4,0	24,4 75,7	7,91 12,40	0,18 1,76	0,60 1,92	0,26 0,41	0,25 6,86	0,23 1,06	26,8 36,4
		4	3,4 4,1	41,8 63,3	7,60 10,70	0,17 1,39	0,49 1,43	0,23 0,37	0,35 7,06	0,15 0,92	23,1 41,2
MOR-MODER	Sénart	1	3,5 4,7	16,6 54,5	4,60 5,92			0,23 0,27			17,8 24,3
		2	3,6 4,5	16,4 50,0	5,73 6,98			0,28 0,34			17,8 23,4
		3	3,8 4,5	14,2 43,9	2,74 4,36			0,17 0,23			13,0 21,8
		4	3,7 4,3	14,0 44,2	3,48 4,85			0,22 0,26			15,2 20,7
		1	3,5 4,7	16,6 54,5	4,60 5,92			0,23 0,27			17,8 24,3
		2	3,6 4,5	16,4 50,0	5,73 6,98			0,28 0,34			17,8 23,4
		3	3,8 4,5	14,2 43,9	2,74 4,36			0,17 0,23			13,0 21,8
		4	3,7 4,3	14,0 44,2	3,48 4,85			0,22 0,26			15,2 20,7
MOR	Taintrax	1	3,4 3,9	13,9 57,9	6,96 9,86	0,16 1,57	0,46 1,27	0,23 0,29	0,35 9,59	0,14 0,72	27,4 36,1
		2	3,1 3,9	10,8 44,2	4,88 6,86	0,12 1,24	0,37 1,13	0,15 0,26	0,22 18,30	0,13 0,96	23,7 37,8
		3	3,3 4,0	24,4 75,7	7,91 12,40	0,18 1,76	0,60 1,92	0,26 0,41	0,25 6,86	0,23 1,06	26,8 36,4
		4	3,4 4,1	41,8 63,3	7,60 10,70	0,17 1,39	0,49 1,43	0,23 0,37	0,35 7,06	0,15 0,92	23,1 41,2
		1	3,4 3,9	13,9 57,9	6,96 9,86	0,16 1,57	0,46 1,27	0,23 0,29	0,35 9,59	0,14 0,72	27,4 36,1
		2	3,1 3,9	10,8 44,2	4,88 6,86	0,12 1,24	0,37 1,13	0,15 0,26	0,22 18,30	0,13 0,96	23,7 37,8
		3	3,3 4,0	24,4 75,7	7,91 12,40	0,18 1,76	0,60 1,92	0,26 0,41	0,25 6,86	0,23 1,06	26,8 36,4
		4	3,4 4,1	41,8 63,3	7,60 10,70	0,17 1,39	0,49 1,43	0,23 0,37	0,35 7,06	0,15 0,92	23,1 41,2

II

de chaque plateau de chaque horizon de surface des cinq stations de la R.C.P. 40

Ca	K	Mg	T	CO ₂	CO ₂ /C	AD	SAC	AMYL	MT	AMMO	CLOS	NX	MFC
				2,21 3,55	0,63 1,09	3,47 4,75	243 367	155 240	10 ⁶ 8.10 ¹¹	2.10 ⁶ 8.10 ¹⁰	7.10 ³ 6.10 ⁹	10 ² 3.10 ³	2.10 ⁵ 8.10 ⁸
				2,39 4,08	0,68 1,08	3,27 5,22	231 386	174 281	2.10 ⁶ 9.10 ¹¹	10 ⁶ 9.10 ¹⁰	7.10 ³ 9.10 ⁹	2.10 ² 4.10 ³	10 ⁵ 9.10 ⁸
				2,46 4,77	0,68 1,08	3,47 6,17	252 496	155 320	2.10 ⁶ 10 ¹²	3.10 ⁶ 10 ¹¹	0 3.10 ⁶	70 7.10 ³	4.10 ⁴ 2.10 ⁸
				2,25 3,41	0,67 1 10	3,60 4,29	210 317	169 226	10 ⁶ 6.10 ⁸	3.10 ⁶ 10 ⁸	0 6.10 ⁴	60 6.10 ³	2.10 ⁵ 2.10 ⁷
4,88 10,30	0,21 0,76	0,67 1,54	12,60 22,00	0,79 1,19	0,84 1,38	0,60 1,11	157 256	80 114	2.10 ⁶ 7.10 ¹¹	8.10 ⁴ 7.10 ¹¹	10 ³ 7.10 ⁷	20 7.10 ³	3.10 ⁵ 7.10 ¹⁰
4,92 12,00	0,08 0,74	0,80 1,77	13,10 29,20	0,83 1,68	0,94 2,26	0,57 1,30	196 309	94 155	3.10 ⁶ 7.10 ¹¹	8.10 ⁴ 7.10 ¹¹	7.10 ² 2.10 ⁵	60 4.10 ³	10 ⁶ 7.10 ¹⁰
6,91 16,30	0,22 0,59	1,23 2,57	12,70 23,90	0,99 1,56	0,89 1,47	0,57 1,26	183 326	102 144	8.10 ⁶ 7.10 ¹¹	10 ⁶ 7.10 ¹¹	2.10 ² 2.10 ⁵	60 2.10 ³	2.10 ⁵ 7.10 ¹⁰
5,09 13,20	0,25 1,04	0,94 2,30	12,60 22,00	0,89 1,36	0,99 1,47	0,77 1,33	207 277	94 146	10 ⁶ 2.10 ⁸	2.10 ⁶ 2.10 ⁸	9.10 ² 5.10 ⁴	40 3.10 ³	8.10 ⁵ 10 ⁷
3,80 9,75	0,07 0,73	0,34 1,66	12,90 21,40	0,71 1,18	0,69 1,05	0,69 1,11	174 258	90 137	2.10 ⁶ 4.10 ⁸	3.10 ⁵ 8.10 ⁷	9.10 ² 4.10 ⁴	60 2.10 ³	2.10 ⁵ 5.10 ⁶
3,12 7,80	0,05 0,44	0,16 1,90	13,50 19,70	0,81 1,11	0,73 0,93	0,66 0,93	183 260	106 138	5.10 ⁶ 3.10 ⁹	10 ⁶ 2.10 ⁸	7.10 ² 2.10 ⁴	40 7.10 ³	7.10 ⁵ 2.10 ⁷
2,14 5,79	0,04 0,39	0,11 1,46	13,10 16,30	0,63 0,93	0,61 0,81	0,69 0,88	152 267	103 128	2.10 ⁶ 10 ⁸	4.10 ⁵ 3.10 ⁷	7.10 ² 4.10 ⁴	0 10 ³	3.10 ⁵ 9.10 ⁶
2,17 5,77	0,00 0,35	0,00 1,90	12,40 19,60	0,72 1,05	0,74 1,05	0,66 0,93	183 283	73 108	3.10 ⁶ 4.10 ⁹	3.10 ⁴ 2.10 ⁹	10 ² 8.10 ³	0 4.10 ²	6.10 ⁵ 5.10 ⁶
0,75 1,63	0,14 0,38	0,26 0,49	11,60 34,40	0,82 1,46	0,39 0,84	0,35 0,93	31 76	70 100		3.10 ⁵ 2.10 ⁹	3.10 ² 2.10 ⁵		4.10 ⁵ 2.10 ⁷
1,34 2,53	0,15 0,34	0,33 0,54	15,00 23,20	1,03 2,42	0,49 1,00	0,44 1,04	59 82	139 197		9.10 ⁵ 7.10 ¹⁰	11.10 ² 9.10 ⁵		5.10 ⁵ 2.10 ⁷
0,73 2,10	0,12 0,33	0,23 0,36	9,38 24,40	0,68 1,54	0,53 1,18	0,51 1,02	144 210	70 144		8.10 ⁵ 10 ⁸	10 ³ 2.10 ⁵		4.10 ⁵ 7.10 ⁷
0,81 1,79	0,10 0,37	0,17 0,33	10,90 28,20	0,64 1,24	0,50 0,83	0,40 0,71	129 183	94 124		10 ⁶ 3.10 ¹⁰	4.10 ² 10 ⁵		3.10 ⁵ 4.10 ⁸
				0,71 1,44	0,26 0,45	0,38 0,69	83 182	116 175	6.10 ⁵ 10 ⁹	4.10 ⁴ 10 ⁷	0 4.10 ³	0 0	9.10 ³ 2.10 ⁶
				0,63 1,04	0,30 0,44	0,29 0,55	61 112	88 157	4.10 ⁵ 7.10 ⁹	5.10 ⁴ 5.10 ⁷	6 7.10 ³	0 0	6.10 ³ 5.10 ⁸
				1,00 1,78	0,25 0,41	0,24 0,75	108 272	141 197	6.10 ⁵ 8.10 ⁹	2.10 ⁵ 4.10 ⁷	20 8.10 ³	0 0	8.10 ³ 5.10 ⁸
				0,98 1,60	0,30 0,48	0,49 0,95	100 221	138 209	5.10 ⁵ 8.10 ⁹	4.10 ⁴ 6.10 ⁶	20 8.10 ⁶	0 0	7.10 ³ 8.10 ⁸

minima, c'est-à-dire les faibles valeurs en N-NH_4 qui ont toujours lieu en hiver et au début du printemps, quelle que soit l'année, le plateau, l'horizon de surface.

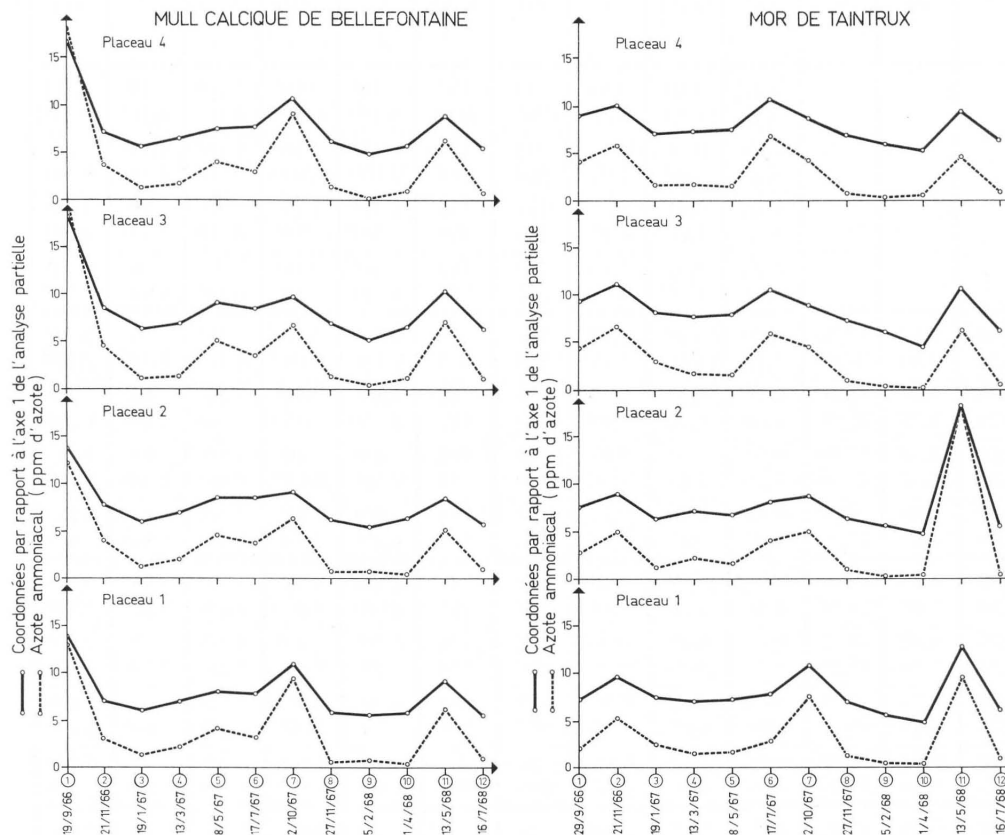


FIG. 1 a. — Variation saisonnière de l'azote ammoniacal dans deux horizons de surface de l'Est de la France : mull calrique de Bellefontaine et mor de Taintrux. Nous avons comparé les variations de la teneur en N-NH_4 (○ --- ○) à la variation saisonnière du facteur prépondérant (d'indice 1) extrait de l'analyse factorielle (○ — ○) coordonnées par rapport à l'axe 1 de l'analyse partielle.

b) *Acides fulviques (AF), acides humiques (AH), azote nitrique (N-NO_3), saccharase (SAC) et autres variables.*

Les variables AF, AH, N-NO_3 , présentent parfois de grandes variations à l'intérieur d'un plateau, mais celles-ci ne se retrouvent pas d'un plateau à l'autre pour un même horizon de surface. Ceci peut signifier que ces variables ne sont pas liées aux saisons, mais rien ne prouve qu'il ne s'agit pas de facteurs écologiques non contrôlés dans cette étude, par exemple l'hétérogénéité des plateaux quant au couvert végétal.

Les variations de la variable SAC (Fig. 2) peuvent être considérées comme d'origine saisonnière, dans le cas d'un seul horizon de surface, le mor de Tain-

trux. On observe deux pics correspondant aux printemps 1967 et 1968. Notons que ces deux pics se retrouvent souvent dans les autres horizons de surface, mais ils sont accompagnés d'autres pics particuliers à un plateau, qu'il est difficile d'interpréter.

En ce qui concerne les autres variables, il n'a pas été possible de mettre en évidence des variations saisonnières à l'aide des données recueillies.

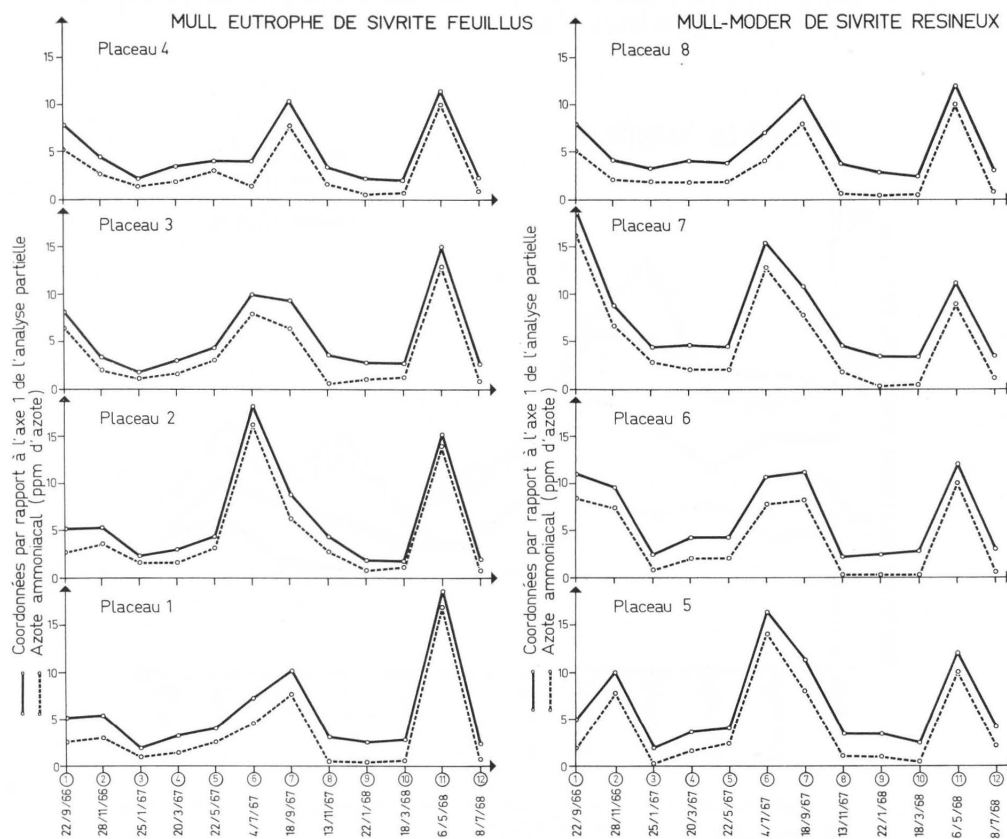


FIG. 1 b. — Variation saisonnière de l'azote ammoniacal dans deux horizons de surface de l'Est de la France : mull eutrophe de Sivrite feuillus et mull moder de Sivrite résineux. Nous avons comparé les variations de la teneur en N-NH_4 (○----○) à la variation saisonnière du facteur prépondérant d'indice 1), extrait de l'analyse factorielle (○—○) coordonnées par rapport à l'axe 1 de l'analyse partielle*.

c) Cas particulier des populations bactériennes.

Le comportement des populations bactériennes est extrêmement particulier, du fait de l'existence de flushes de densité provenant d'une grande hétérogénéité, aussi bien spatiale que temporelle. La Figure 3 représente la

* Sur les graphiques de droite de la figure 1 b, lire, de bas en haut, plateau 1, 2, 3, 4 au lieu de plateau 5, 6, 7, 8.

variation des densités de bactéries ammonifiantes dans les quatre placeaux du mull calcique de Bellefontaine. L'échelle utilisée étant logarithmique, on a ainsi une idée des variations très importantes d'un prélèvement à l'autre. On peut voir sur ce graphique que les quatre placeaux ont un comportement particulier, cependant, il faut remarquer que deux flushes plus importants se produisent, l'un au 5^e prélèvement (08.05.67), l'autre au 8^e (27.11.67). Le premier a lieu pour les placeaux 1 et 2, le second pour les placeaux 1, 2, 3. Lorsqu'elles existent, les concordances entre placeaux correspondent à des variations partiellement indépendantes du site.

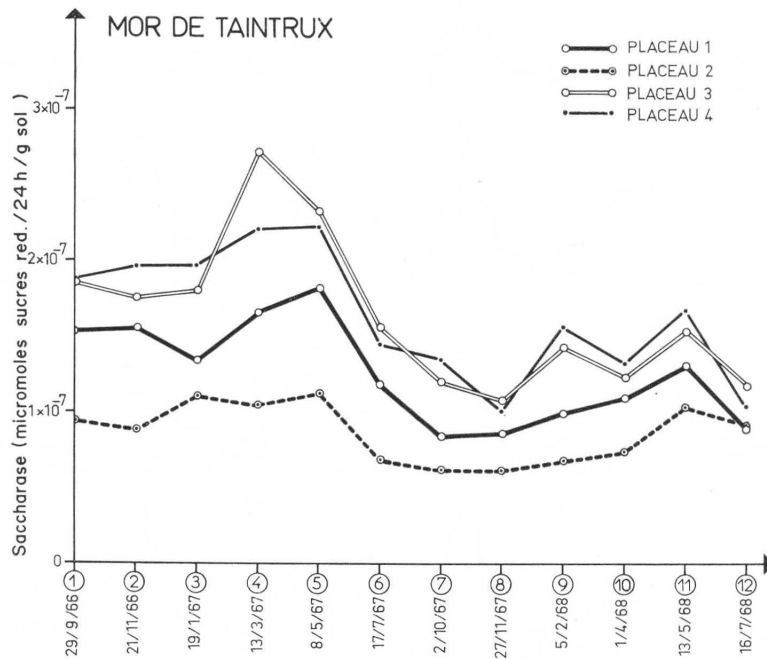


FIG. 2. — Variation saisonnière de la teneur en saccharose dans l'horizon de surface des quatre placeaux du mor de Taintrux.

De plus, remarquons que les placeaux 1, 2, 3 montrent également une brusque variation dans les caractéristiques enzymatiques, mais cette variation est décalée d'un mois (9^e prélèvement), le placeau 4 ne présentant pas ce phénomène. D'autre part, on ne décèle pas de liaison entre les variations de densité des bactéries ammonifiantes et la teneur en $N-NH_4$.

Le phénomène de flush de densité s'observe pour les bactéries ammonifiantes dans tous les horizons de surface et il se manifeste également pour tous les autres groupes de bactéries étudiées, mais nous n'avons pas jugé utile de représenter les courbes correspondantes, car elles sont du même type.

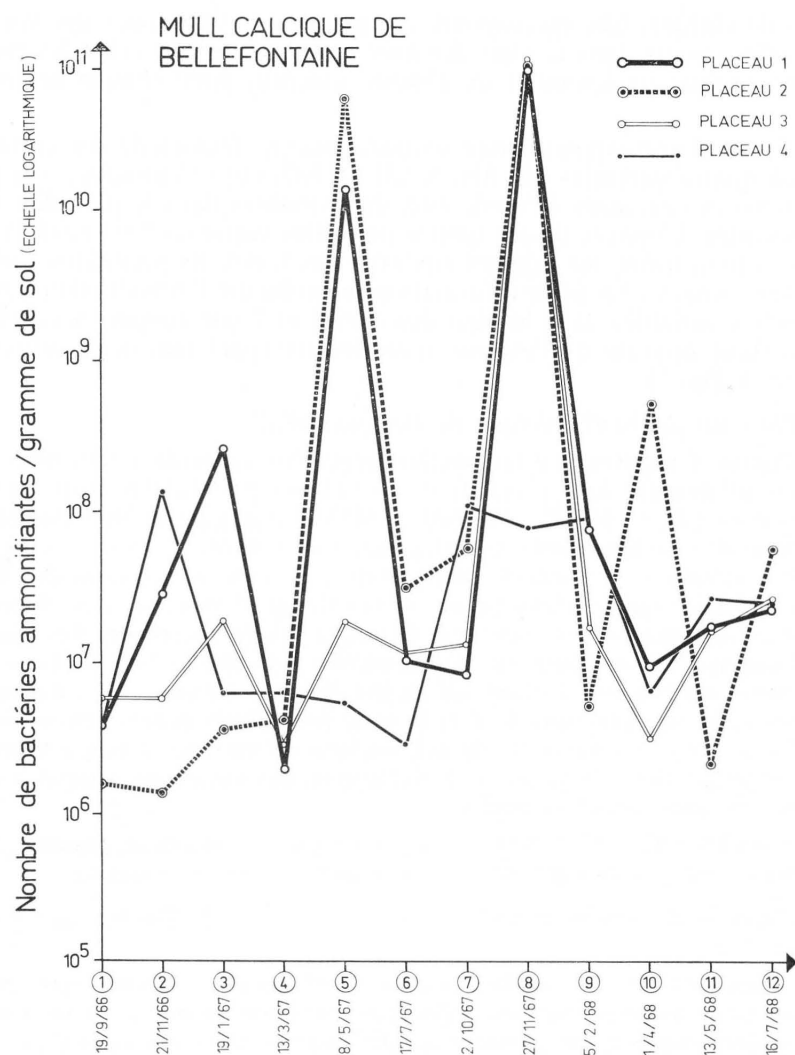


FIG. 3. — Variation saisonnière du nombre (densité) de bactéries ammonifiantes dans l'horizon de surface des quatre placeaux du mull calcique de Bellefontaine.

3) Comparaison des placeaux.

Des analyses partielles ont été entreprises pour tester l'homogénéité d'un horizon de surface. Ces analyses faites à partir de regroupement de variables, ont nécessité plusieurs graphiques. Il n'est pas nécessaire de les présenter tous, les Fig. 4 et 5 suffisent à en donner une bonne illustration.

La Figure 4 concerne la première analyse factorielle des correspondances entre dix variables (pH, H, C, N, C/N, CO₂/C, AD, SAC, AMYL) et les cinq

horizons de surface. Elle correspond à la projection simultanée des variables et des prélèvements dans le plan des axes 1 et 2 et met en relief les particularités de chaque prélèvement de chaque plateau, pour chaque horizon de surface.

La Figure 5 correspond à une seconde analyse factorielle des correspondances où quatre variables AF, AH, N-NH₄, N-NO₃ ont été ajoutées aux précédentes. Dans ce cas, seule la projection des variables dans le plan des axes a été représentée. L'apport de ces quatre nouvelles variables * ne modifie absolument pas la position par rapport aux axes 1 et 2, des dix premières variables et des prélèvements. La seule information nouvelle est l'introduction des quatre nouvelles variables dans le plan des axes 1 et 2 par rapport à celles déjà utilisées. Dans la suite de l'exposé, nous ferons appel aux deux représentations (Fig. 4, Fig. 5).

a) *Placeaux du mull calcique de Bellefontaine.*

La Figure 4 montre que les prélèvements correspondant aux placeaux 1 et 4, particulièrement le 4, présentent des valeurs plus faibles pour les variables suivantes : H, C, N, CO₂, AD, SAC, AMYL. Le groupe qu'ils forment s'oppose à celui des prélèvements des placeaux 2 et 3. Dans ce second groupe, on note une anomalie difficilement interprétable, à savoir la position des 9^e prélèvements (5.2.68) qui se classent au niveau des prélèvements des placeaux 1 et 4. Sur cette figure, on observe que le nuage des prélèvements des placeaux du mull calcique de rendzine de Bellefontaine est étiré le long de l'axe 1, les prélèvements du plateau 4 étant les moins éloignés du côté des valeurs positives, puis ceux des placeaux 1, 2 et 3, avec les mêmes points anormalement placés. On a donc, à l'intérieur de cet horizon de surface, à haute teneur en matière organique et à forte activité biologique, des variations spatiales simultanées de ces deux caractéristiques.

Les variables AF, AH, N-NO₃, ne séparent pas les placeaux, l'hétérogénéité à l'intérieur d'un plateau masquant l'éventuelle variation spatiale.

b) *Placeaux du mull eutrophe et du mull-moder de Sivrite sous feuillus et résineux.*

Ces deux horizons de surface, qui appartiennent au même type pédologique (sol brun lessivé), ont été regroupés dans une même analyse partielle. Comme précédemment, on retrouve les différences entre placeaux d'un même horizon de surface et des variables qui présentent des variations indépendantes plus importantes à l'intérieur d'un plateau qu'entre les placeaux. Mais le fait le plus marquant est la mise en évidence de la nature différente des deux horizons de surface par le regroupement, propre à chacun, des prélèvements de leurs placeaux. Ceci se traduit (Fig. 4) par les valeurs décroissantes des variables pH, CO₂, CO₂/C, AD, SAC, et croissantes de la variable C/N en allant du mull eutrophe au mull-moder. Par ailleurs, pour cette étude, bien qu'elles ne soient pas représentées, quatre variables Ca, K, Mg, T ont été introduites. L'analyse partielle nous montre également une baisse significative des

* Ces variables manquent pour le mor-moder de Sénart. Cependant, ce fait ne nuit pas à l'interprétation, car le programme utilisé reste applicable dans le cas de manquants.

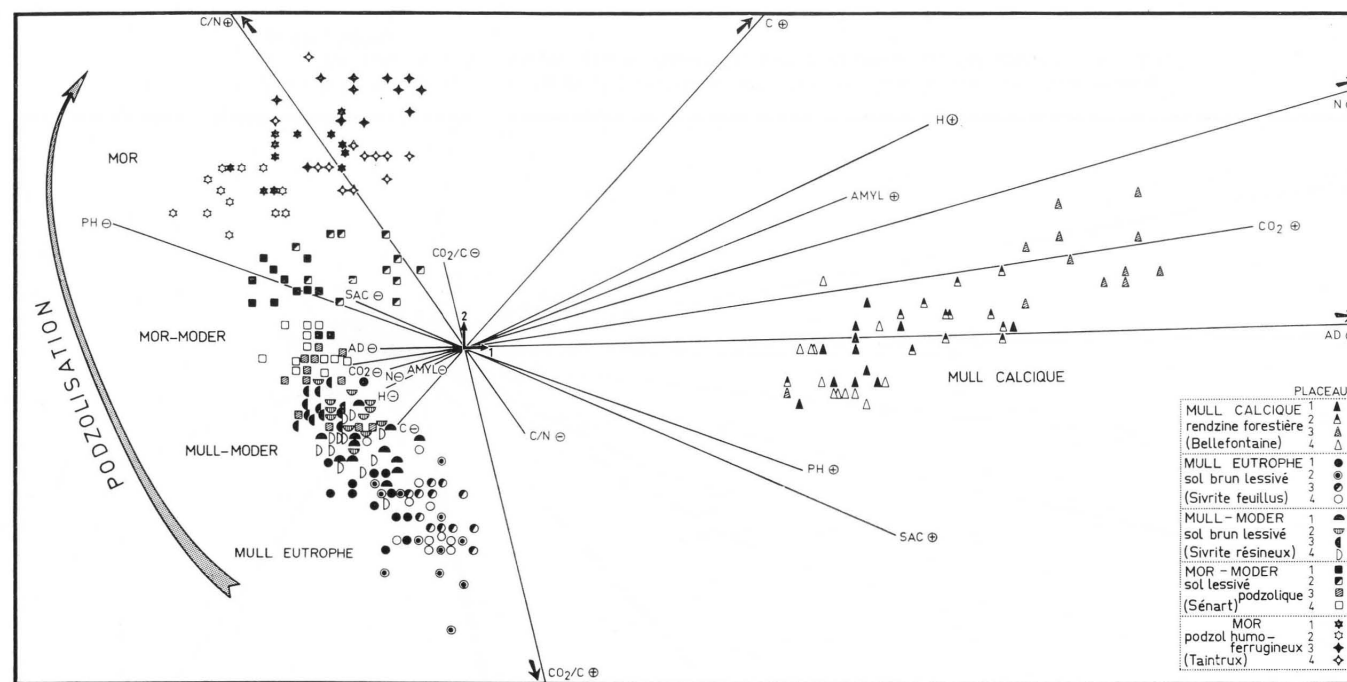


FIG. 4. — Première analyse factorielle. Représentation dans le plan des deux premiers axes des variables : pH, H, C, N, C/N, CO₂, CO₂/C, AD, SAC AMYL, et des prélèvements de chaque plateau des horizons de surface étudiés : mull calcique de rendzine forestière de Bellefontaine, mull eutrophe de sol brun lessivé de Sivrite feuillu, mull-moder de sol brun lessivé de Sivrite résineux, mor de podzol humoferrugineux de Taintrux.

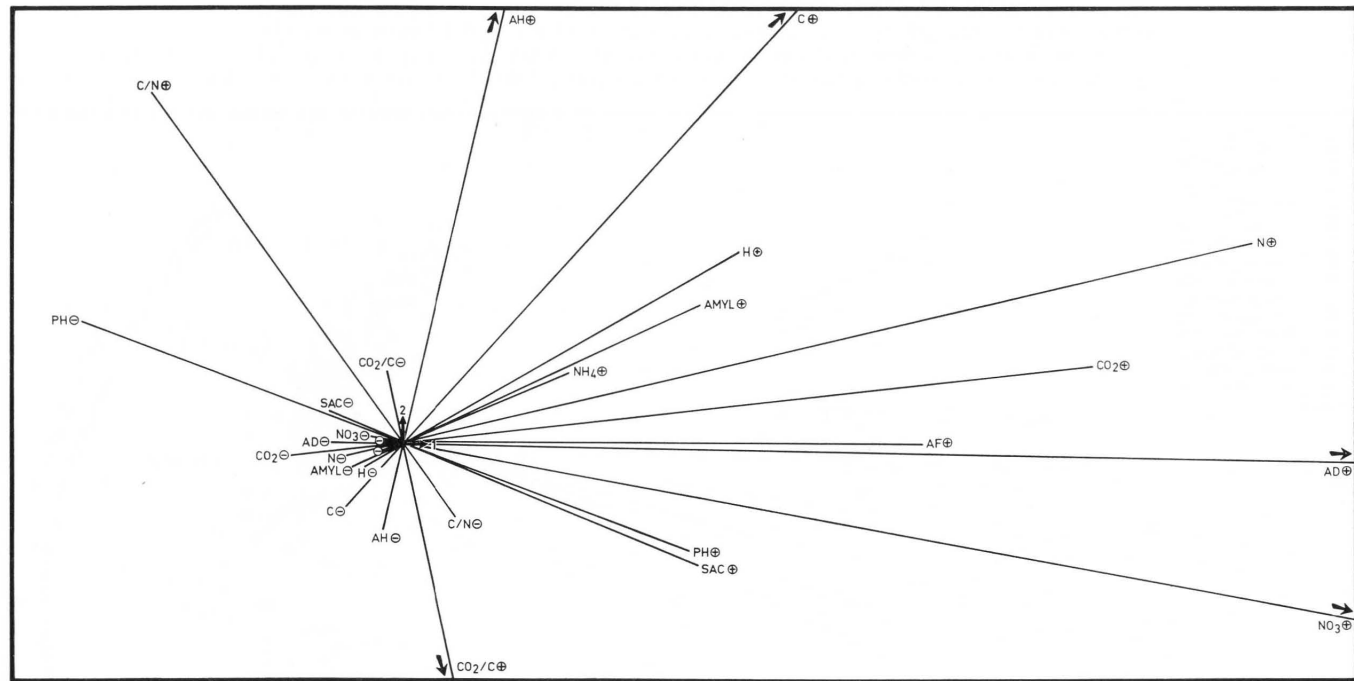


FIG. 5. — Deuxième analyse factorielle. Représentation des variables dans le plan des deux premiers axes. Par rapport à la première analyse factorielle, quatre variables ont été ajoutées : AF, AH, $N-NH_4$, $N-NO_3$.

valeurs des trois premières variables, sous l'influence de la plantation de résineux.

c) *Placeaux du mor-moder de Sénart.*

Les prélèvements des placeaux 1 et 2 se distinguent des prélèvements des placeaux 3 et 4 par les valeurs plus élevées de leurs variables : C, N, C/N (plus sensible pour le C) et plus faibles de leurs variables : pH, CO₂/C, AD, SAC. Les prélèvements des placeaux 1 et 2 sont plus proches du type mor, les prélèvements des placeaux 3 et 4 sont plus proches du type moder.

d) *Placeaux du mor de Taintrux.*

Les prélèvements des placeaux 1 et 2 par rapport à ceux des placeaux 3 et 4 forment un groupe dont les valeurs sont moins élevées pour les variables H, C, N, CO₂, AD, SAC, AMY. Mais ils ont en commun d'être caractérisés par un pH très bas et les valeurs les plus élevées pour les variables AH, C/N. Remarquons que ces trois variables ne permettent pas de séparer ici les placeaux, ce qui montre l'intérêt des analyses partielles.

Les analyses partielles, sans masquer une certaine hétérogénéité des placeaux de chaque horizon de surface, nous montrent cependant les analogies qui existent entre placeaux et nous permettent sans ambiguïté de caractériser les horizons de surface. Ceci est traduit sur la figure 4 par l'étirement respectif des prélèvements propres à chaque horizon de surface à la fois le long de l'axe 1 et le long de l'axe 2.

4) Comparaison des horizons de surface.

a) *Horizon de surface du mull calcique de Bellefontaine.*

Cet horizon se sépare très nettement des autres par sa position par rapport à l'axe 1 (Fig. 4). Il se caractérise essentiellement par des valeurs élevées pour les variables pH, H, C, AF, N, N-NO₃, CO₂, CO₂/C, AD, SAC, AMYL et le plus faible rapport C/N. Il s'agit-là d'une rendzine typique présentant des caractéristiques chimiques classiques : pH élevée et stock de matière organique facilement métabolisable. Les valeurs assez élevées de la variable AF, confirme les études récentes du Centre de Pédologie Biologique de Nancy d'où il découle que contrairement à ce qui était admis, cette variable pourrait avoir des valeurs élevées pour les mulls de rendzine (JACQUIN, LE TACON, 1970).

Sur le plan biologique, la nitrification est nettement plus importante que dans les autres types pédologiques, ce qui est un fait bien connu. L'ammonification estimée par la valeur de la variable N-NH₄ ne permet pas de séparer ce mull calcique de rendzine des autres horizons de surface ; les deux pôles de cette variable sont peu éloignés l'un de l'autre (Fig. 4), vraisemblablement en raison de sa forte variabilité dans le cadre d'un même placeau. Les valeurs élevées obtenues ici des variables AD, SAC, AMYL confirment les travaux antérieurs (BAUZON *et al.*, 1968).

b) *Horizons de surface du mull eutrophe de Sivrite sous feuillus, du mull-moder de Sivrite sous résineux, du mor-moder de Sénart et du mor de Taintrux.*

Le nuage de points regroupant ces quatre horizons de surface, présente deux types extrêmes : le mull eutrophe de Sivrite sous feuillus (sol brun

lessivé) et le mor de Taintrux (podzol humoferrugineux). Entre les deux, se placent successivement, étirés le long de l'axe 1, mais surtout le long de l'axe 2, le mull-modér de Sivrite sous résineux (sol brun lessivé) et le mor-modér de Sénart (sol lessivé podzolique). La Figure 4 met clairement en évidence l'existence d'une série évolutive d'humus, allant du mull eutrophe au mor, conforme au schéma classique proposé par DUCHAUFOUR (1970) pour les variables chimiques, et par BAUZON *et al.* (1968) pour les variables biologiques. Une telle série est caractérisée par les valeurs décroissantes des variables pH, CO₂/C, SAC, et croissantes des variables C, AH, C/N, ce qui traduit l'intensité de la podzolisation du mull au mor.

La comparaison des deux horizons de surface de Sivrites sous feuillus et sous résineux, par leur position par rapport aux axes 1 et 2 (Fig. 4) confirme l'influence de l'introduction des résineux (BAUZON *et al.*, 1969). Cette introduction a pour effet de diminuer les valeurs des variables pH, CO₂, CO₂/C, AD, SAC et d'augmenter les valeurs des variables C, AH, C/N. Il en résulte que sur la Figure 4, le mull eutrophe de Sivrite sous feuillus est, du côté des valeurs négatives de l'axe 1, moins éloigné que le mull-modér de Sivrite sous résineux.

CONCLUSIONS

1) Écologiques.

L'analyse factorielle des correspondances a mis en évidence des variations saisonnières très nettes, principalement de la variable N-NH₄* pour les horizons de surface du mull calcique, mull eutrophe, mull modér et mor et de la variable SAC pour l'horizon de surface du mor. Les autres variables présentent des variations incontestables, qui nous font penser que chaque point a un comportement particulier. En ce qui concerne les numérations bactériennes, on constate une grande variation à la fois spatiale et temporelle, d'où l'absence de variations significatives entre les différents prélèvements. Les données obtenues suggèrent l'existence dans les sols de flushes de densités microbiennes parfois considérables, identiques à ce que nous connaissons pour les bactéries sulfato-réductrices qui sont à l'origine du dépérissement de certaines cultures dans les sols salins (DOMMERGUES *et al.*, 1969). Récemment, des flushes d'activité nitrogénasique ont été décelés dans les sols (BALANDREAU, DOMMERGUES, 1972). Ces brusques accroissements de densités ou d'activité microbienne, n'apparaissent que si plusieurs facteurs de l'environnement climatique et édaphique atteignent simultanément une valeur optimale. L'analyse factorielle montre également la variation spatiale des conditions régnant dans un horizon de surface, en ce qui concerne les variables chimiques pH, H, C, N, C/N et biologiques CO₂, AD, SAC, AMYL, principalement. D'autre part, elle permet de caractériser et de classer les horizons de surface les uns par rapport aux autres. En particulier elle montre très clairement que nous sommes en présence d'une série évolutive d'humus allant du mull calcique au mor, série évolutive déjà décelée par BAUZON *et al.* (1968)

* Rappelons que cette variable a été étudiée seulement dans quatre des cinq horizons de surface.

avec d'autres méthodes d'analyse statistique. Elle confirme par ailleurs l'influence dépressive et l'enrésinement sur l'activité biologique du sol (BAUZON *et al.*, 1969).

2) Méthodologiques.

L'étude des variations annuelles des caractéristiques chimiques et biologiques doit être de nature ponctuelle plus que stationnelle. Ceci découle du fait que, souvent, les variations observées ne se retrouvent pas d'un plateau à l'autre ; on ne peut alors affirmer que les différences rencontrées au cours des prélèvements successifs dans un même plateau correspondent à des variations saisonnières.

Les résultats des numérations bactériennes confirment les conclusions auxquelles ont abouti quelques auteurs (voir par exemple DOMMERGUES, 1973) : l'échantillonnage de micropopulations est dénué d'intérêt si l'on se place à l'échelle habituelle de l'échantillon de sol. Il n'est concevable qu'à l'échelle du microhabitat, par exemple rhizosphère, phyllosphère de feuilles tombées, microenvironnement de résidus végétaux ou animaux.

REMERCIEMENTS

Nous adressons toute notre gratitude à M. J. GOULON, Laboratoire de Chimie Théorique, Université de Nancy pour la part importante qu'il a prise dans la présentation de l'analyse factorielle des correspondances.

Nos remerciements vont également à M^{me} Sylvie ROUSSEAU, Muséum National d'Histoire Naturelle, Brunoy, qui a réalisé avec compétence la mise en forme des figures et à M. HAZEMANN, Centre de Pédologie Biologique, Vandœuvre-les-Nancy, qui a réalisé l'installation des stations lorraines.

RÉSUMÉ

Les caractéristiques chimiques et biologiques des horizons de surface de cinq stations forestières, quatre de l'Est de la France, une du Bassin Parisien, ont été mesurées pendant une période de deux ans. Les données recueillies ont été interprétées par la méthode d'analyse factorielle des correspondances. L'incidence des saisons est très nette pour certaines variables ; pour d'autres, elle ne se manifeste pas clairement car plus ou moins masquée par des facteurs non contrôlés.

Bien qu'à l'intérieur de chaque station les caractéristiques de l'horizon de surface présentent des variations spatiales et temporelles significatives, il est possible d'ordonner les horizons de surface des stations suivant une série évolutive allant du mull calcique au mor.

On a confirmé, d'autre part, l'influence dépressive de l'enrésinement sur l'activité biologique des sols.

SUMMARY

The chemical and biological characteristics of surface horizons of five forest soils (France) were measured at regular intervals of time for two years. Data were interpreted through the factor analysis method. Some variables showed significant seasonal variations; but others did not, the absence of signification being attributed to the involvement of uncontrolled factors.

In spite of different types of variation which affected the biological characteristics studied here, surface horizons could be arranged in a progressive series from calcic mull to mor.

The inhibiting effect of conifers upon soil biological activity was confirmed.

BIBLIOGRAPHIE

- BALANDREAU (J.), DOMMERGUES (Y.), 1972. — Assaying nitrogenase activity in the field. *Bull. Ecol. Res. Comm.* (Stockholm), **17**: 247-254.
- BAUZON (Danièle), ROUILLER (J.), BACHELIER (G.), 1967. — Caractéristiques pédologiques et microbiologiques des sols de la station R.C.P. 40 de la Forêt de Sénart et du Parc de Brunoy. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **4**: 533-551.
- BAUZON (Danièle), VAN DEN DRIESSCHE (R.), DOMMERGUES (Y.), 1968. — Caractérisation respirométrique et enzymatique des horizons de surface des sols forestiers. *Science du Sol*, **2**: 55-78.
- BAUZON (Danièle), VAN DEN DRIESSCHE (R.), DOMMERGUES (Y.), 1969. — L'effet-litière. I. - Influence *in situ* des litières forestières sur quelques caractéristiques biologiques de sols. *Oecol. Plant.*, **4**: 99-122.
- CASIDA (L. E.), KLEIN (D. A.), SANTORO (T.), 1964. — Soil dehydrogenase activity. *Soil Sci.*, **98**: 371-376.
- CORDIER (B.), 1965. — L'analyse factorielle des correspondances. *Thèse de 3^e cycle*, Rennes.
- DEFAYOLLE (M.), COLOBERT (L.), PONCET (P.), BUISSIÈRE (J.), PONTIER (J.), 1968. — Application de l'analyse factorielle à la taxonomie des microorganismes. *Biom. Prax.*, **9**: 14-51.
- DELAMARE DEBOUTTEVILLE (C.), VANNIER (G.), 1966. — La recherche coopérative sur programme en écologie ou R.C.P. 40. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **3**: 523-531.
- DOMMERGUES (Y.), 1960. — La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *Agron. Trop.*, **15**: 54-60.
- DOMMERGUES (Y.), DUCHAUFOR (Ph.), 1965. — Étude comparative de la dégradation biologique des complexes organo-ferriques dans quelques types de sols. *Science du sol*, **1**: 43-59.
- DOMMERGUES (Y.), DUCHAUFOR (Ph.), 1966. — Caractérisations pédologiques et microbiologiques des stations lorraines R.C.P. 40. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **3**: 533-547.
- DOMMERGUES (Y.), COMBREMONT (R.), BECK (Geneviève), OLLAT (C.), 1969. — Note préliminaire concernant la sulfato-réduction rhizosphérique dans un sol salin tunisien. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **6**: 115-129.
- DOMMERGUES (Y.), 1973. — Principes de méthodologie en microbiologie du sol. In « Nouveaux documents pour une étude intégrée en écologie du sol », C.N.R.S., Paris, **3**: 13-30.

- DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1966. — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. E.N.S.A.I.A., Nancy*, **8**: 3-24.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1970. — *Précis de Pédologie*. Masson, Paris.
- HIERNAUX (J.), 1965. — Une nouvelle mesure de distance anthropologique entre populations utilisant simultanément des fréquences géniques, des pourcentages de traits descriptifs et des moyennes métriques. *C.R. Acad. Sci., Paris*, **260**: 1748-1750.
- HOFMANN (E.), SEEGERER (A.), 1951. — Die enzyme in Boden als Faktoren seiner Fruchtbarkeit. *Naturwissensch.*, **38**: 141-142.
- JACKSON (M. L.), 1960. — Soil chemical analysis. Prentice-Hall inc. Englewood Cliffs, N. J.
- JACQUIN (F.), LE TACON (F.), 1970. — Influence des formes de calcium sur l'évolution des résidus ligneux. *Bull. E.N.S.A.I.A., Nancy*, **12**: 12-20.
- LEBART (L.), FÉNELON (J. P.), 1971. — *Statistique et informatique appliquées*. Dunod, Paris.
- MEIKLEJOHN (J.), 1953. — Iron and the nitrifying bacterie. *J. Gen. Microbiol.*, **8**: 58-65.
- MEIKLEJOHN (J.), 1965. — Microbiological studies on large termite mounds. *Rhod. Zamb. Mal. J. Agric. Res.*, **3**: 67-79.
- POCHON (J.), TARDIEUX (P.), 1962. — *Techniques d'analyse en microbiologie du sol*. Ed. de la Tourelle, Saint-Mandé.
- ROSS (D. J.), 1965. — A seasonal study of oxygen uptake of some pasture soils and activities of enzymes hydrolysing sucrose and starch. *J. Soil Sci.*, **16**: 73-85.
- SPEARMAN (C.), 1904. — The proof and measurement of association between two things. *Am. J. Psych.*, **15**: 72-101.
- VAN DEN DRIESCHE (R.), 1965. — La recherche des constellations de groupes à partir des distances généralisées D^2 de Mahalanobis. *Biom. Prax.*, **6**: 36-47.